

Д. т. н. **Д. А. Иванов**<sup>1</sup> (✉), **Д. А. Тарасов**<sup>2</sup>, к. т. н. **М. Н. Кудряш**<sup>2</sup>,  
к. т. н. **Л. В. Федорова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Кит-Строй», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.798.2:666.762.11-492].001.5

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КЕРМЕТА $Al-\alpha-Al_2O_3$ , ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРУНДОВЫХ МИКРОСФЕР СПЕКАНИЕМ В ВАКУУМЕ

Кермет состава  $Al-\alpha-Al_2O_3$  (90 об. %) был изготовлен с использованием полых корундовых микросфер (ПКМ) узкой фракции 40–70 мкм, полученных методом плазменной сфероидизации, и алюминиевой пудры марки ПАП-2. При жидкофазном спекании порошковых заготовок по границе раздела между ПКМ и ПАП-2 формировался адгезионный тип связи в результате кристаллизации эвтектического расплава  $Al-Al_4C_3$  при охлаждении от температуры спекания. Полученный кермет обладал следующими свойствами: плотность 2,67–2,89 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость 19–11 %, предел прочности при изгибе 47–70 МПа, при сжатии 100–150 МПа, микротвердость по Виккерсу 1550–1960 МПа, прочность при ударном изгибе  $3,53 \cdot 10^3$ – $4,27 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>, трещиностойкость 1,7–2,9 МПа·м<sup>1/2</sup>. Разработанный материал может быть рекомендован в качестве абразивного инструмента для выглаживания поверхности деталей из металлов и сплавов на стадии финишной механической обработки.

**Ключевые слова:** кермет  $Al-\alpha-Al_2O_3$ , полые корундовые микросферы (ПКМ), алюминиевая пудра ПАП-2, плазменная сфероидизация, жидкофазное спекание, фрактограмма поверхности разрушения.

### ВВЕДЕНИЕ

**К**орундовые микросферы находят широкое применение в разных областях техники. Их используют в качестве наполнителей в полимерах и резине [1–3], в составе многофункциональных покрытий [4–6] и огнеупоров [7–9] для улучшения их эксплуатационных свойств.

Известны разные методы получения корундовых микросфер, которые в соответствии с технологическими условиями их получения могут содержать замкнутые газонаполненные полости. Такие микросферы получают с использованием подходов коллоидной химии [10–12], распылительной сушкой суспензий [12], гидротермальным синтезом [13, 14], раздувом струи алюмооксидного расплава [8]. Кроме того, для изготовления полых корундовых микросфер (ПКМ) проводят пиролиз аэрозоля, полученного

ультразвуковым распылением водного раствора алюминийсодержащей соли [15]. Получение ПКМ возможно за счет использования порошковой технологии, согласно которой на поверхности органической гранулы сферической формы (ядро) создают покрытие из алюмооксидного порошка (оболочка) с последующим выжигом ядра и спеканием оболочки [16].

Разработан также метод химического диспергирования алюминиевых сплавов, после завершения которого проводили термообработку полученного продукта на воздухе, обеспечивающую синтез ПКМ [17].

Следует отметить, что наиболее производительным считается метод плазменной сфероидизации алюмооксидного порошка [18]; при этом для генерации плазмы используют различные виды электрических разрядов: электродуговой, высокочастотный и сверхвысокочастотный [19, 20]. Кроме того, возможно проведение сфероидизации прекурсора в факеле пламени, образующегося при горении кислородно-метановой смеси [21].

В настоящее время значительное внимание разработчиков привлекают так называемые синтаксические пенопласты [22–28], в объеме которых совмещаются пористая матрица на



Д. А. Иванов  
E-mail: dali\_888@mail.ru

основе алюминия или его сплава с ПКМ. Такие материалы относятся к классу керметов, они обладают малой плотностью и демонстрируют повышенные упруго-пластические и демпфирующие свойства при статическом и ударном приложении нагрузки [22, 23, 25, 26]. Это позволяет использовать их в качестве защитных энергопоглощающих изделий и деталей в разных конструкциях. Эти материалы могут быть получены пропиткой под давлением заготовок из ПКМ расплавом на основе алюминия [25, 26, 28].

В настоящей работе изучены физико-механические свойства и особенности структуры кермета  $Al-\alpha-Al_2O_3$ , полученного жидкофазным спеканием в вакууме порошковых заготовок из смеси алюминиевого порошка ПАП-2 с ПКМ, полученными методом плазменной сфероидизации. В этом случае жидкофазное спекание обеспечивалось за счет возникновения эвтектического расплава  $Al-Al_4C_3$  [29, 30].

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления кермета  $Al-\alpha-Al_2O_3$  использовали полые корундовые микросферы узкой фракции 40–70 мкм (марка НСМ-70, производитель — предприятие «Кит-Строй», СПб.) и промышленно производимую алюминиевую пудру марки ПАП-2 (ГОСТ 5494–95), состоящую из чешуйчатых частиц субмикронной толщины [30].

Опытные образцы получали путем сухого смешивания ПАП-2 со сферическими частицами, прессования полученной порошковой смеси в стальной пресс-форме с варьированием давления прессования  $P$  в интервале 300–900 МПа и последующего жидкофазного спекания порошковых заготовок ПЗ в вакууме ( $10^{-5}$  мм рт. ст.) при 650 °С в течение 1 ч. При этом использовали порошковую смесь, содержащую 70 об. % пудры ПАП-2 ( $V_1$ ) и 30 об. % микросфер ( $V_2$ ). При прессовании происходило значительное уплотнение пудры ПАП-2 в смеси, вследствие чего, по оценочным данным микроскопического анализа, соотношение  $V_1 : V_2$  в спеченном кермете составляло 10 : 90.

Следует отметить, что дальнейшее снижение объемной доли ПАП-2 в порошковой смеси нецелесообразно, так как приводило к дискретному распределению ПАП-2 и, как следствие, к присутствию значительного количества контактов микросфера – микросфера без промежуточной разделяющей алюминиевой прослойки после прессования. Поэтому выбранное в эксперименте соотношение  $V_1 : V_2$  определяет максимально возможное содержание микросфер в кермете

Открытую пористость  $P_{отк}$  и плотность  $\rho$  материала определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 2409–80. Предел

прочности при поперечном изгибе  $\sigma_{изг}$  оценивали на призматических образцах (10×10×50 мм) по ГОСТ 18228–94, при осевом сжатии  $\sigma_{сж}$  — на цилиндрических образцах диаметром 20 и высотой 30 мм по ГОСТ 4071.2–94 (ИСО 8895–86); испытания проводили при комнатной температуре на установке TIRATEST–2300 (Германия) при скорости деформирования 1 мм/мин.

Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  определяли по ГОСТ 25.506–85. Для этого на призматических образцах (10×10×50 мм) создавали боковой надрез длиной, равной 0,5 высоты, с радиусом кривизны вершины надреза 50 мкм. Для деформирования образцов применяли 3-точечную схему нагружения на установке TIRATEST–2300 при скорости перемещения траверсы 0,15 мм/мин. Предел прочности при ударном изгибе  $KC$  определяли по ГОСТ 26528–98 на маятниковом копре Zwick HIT50P (Германия), микротвердость по Виккерсу  $HV$  — по ГОСТ 9450–76 на шлифах с использованием прибора Micromet 5101 (Япония) путем вдавливания алмазной пирамидки индентора под нагрузкой 0,5 Н.

Электронно-микроскопический анализ структуры проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) TESCAN Mira 3 (Чехия) с поверхности излома, с поверхности грани образца после химического травления 20 %-ной плавиковой кислотой и с поверхности шлифа.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что повышение давления прессования от 300 до 900 МПа приводит к возрастанию плотности от 2,67 до 2,89 г/см<sup>3</sup>, снижению открытой пористости от 19 до 11 % (рис. 1), к повышению физико-механических свойств материала: предела прочности при изгибе от 45 до 70 МПа, при сжатии от 100 до 150 МПа, микротвердости по Виккерсу от 1550 до 1960 МПа (рис. 2), а также предела прочности при ударном изгибе от  $3,53 \cdot 10^3$  до  $4,27 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup> и трещиностойкости от 1,7 до 2,9 МПа·м<sup>1/2</sup> (рис. 3).

Исследование структуры поверхностного слоя спеченных образцов после химического травления показало, что микросферы при приложении давления прессования в выбранном интервале (300–900 МПа) сохраняют свою целостность (рис. 4). Из этого следует, что улучшение физико-механических свойств определяется степенью уплотнения при прессовании алюминиевой прослойки из ПАП-2, равномерно распределенной между микросферами. В данном случае алюминиевая пудра ПАП-2 в исходной порошковой смеси выполняла функцию пластичной связки для микросфер, а также демпфирующей прослойки, обеспечивающей релаксацию напряжений, возникающих при приложении давления прессования.

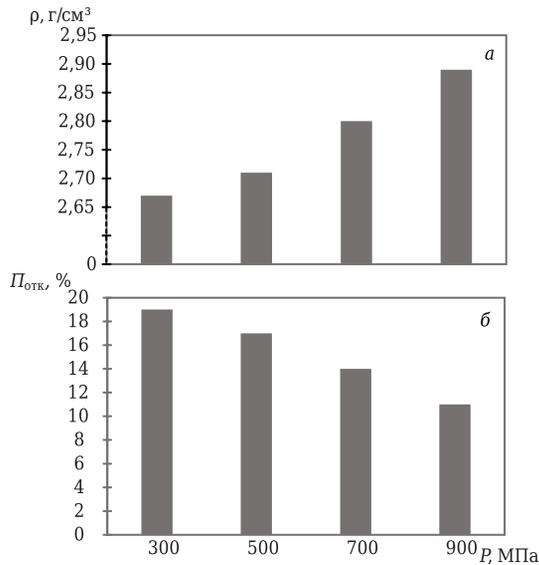


Рис. 1. Зависимости плотности (а) и открытой пористости (б) от давления прессования

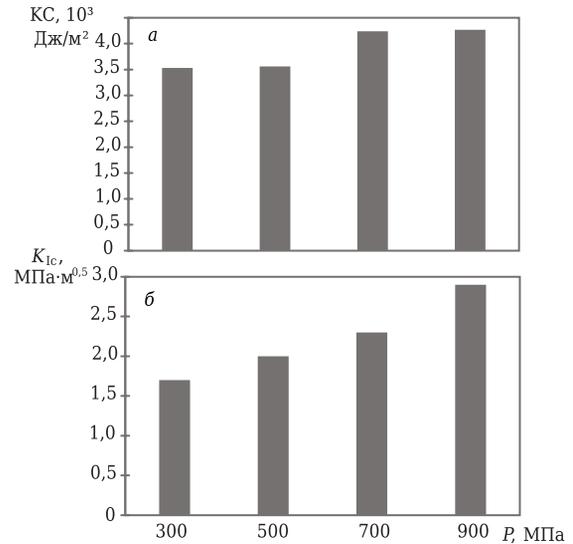


Рис. 3. Зависимости прочности при ударном изгибе (а) и трещиностойкости (б) от давления прессования

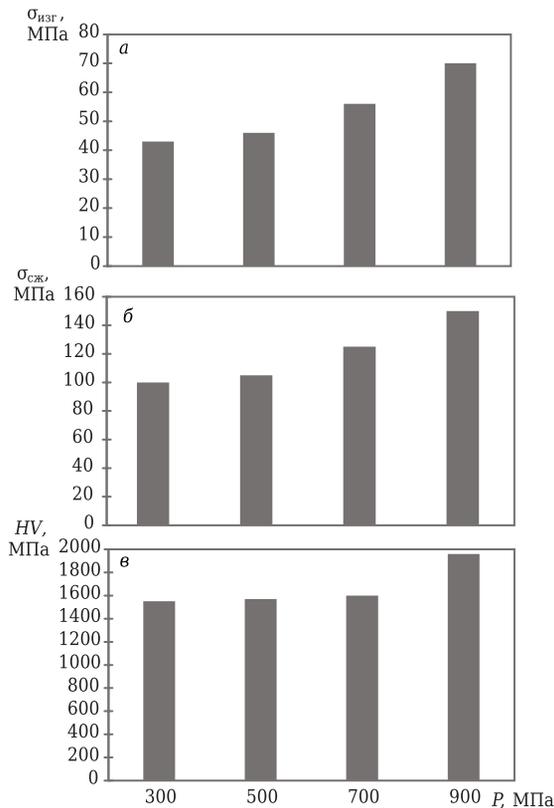


Рис. 2. Зависимости предела прочности при изгибе (а), при сжатии (б) и микротвердости (в) от давления прессования

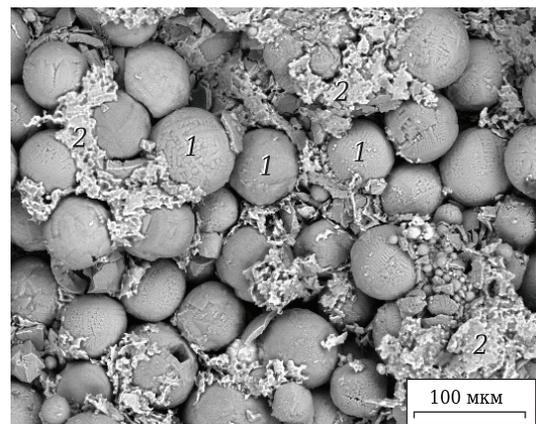


Рис. 4. Поверхность образца кермета Al-α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (90 об. %) после химического травления: 1 — микросферы; 2 — связка из ПАП-2

Из результатов, приведенных в таблице, следует, что разработанный кермет (№ 1) существенно уступает по прочностным характеристикам (σ<sub>изг</sub>, σ<sub>сж</sub>, K<sub>1с</sub>, KS) материалу из ПАП-2 без микросфер (№ 2). Это обусловлено тем, что микросферы в составе материала № 1 можно рассматривать как концентраторы напряжений, передающихся на алюминиевую прослойку при нагружении.

Кроме того, видно, что значения параметров кермета K<sub>1с</sub>, KS и HV сопоставимы с показателями этих свойств плотноспеченной алюмооксид-

**Физико-механические свойства материалов**

Кермет*	ρ, г/см³	P <sub>отк</sub> , %	σ <sub>изг</sub> , МПа	σ <sub>сж</sub> , МПа	HV, МПа	K <sub>1с</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	KS, 10³ Дж/м²
№ 1	2,67–2,89	19–11	43–70	100–150	1550–1960	1,7–2,9	2,53–4,27
№ 2	2,60	1,2	400	292	660	18,0	70,0
№ 3	3,89	0	250	510	2000	3,0	5,0

\* № 1 — разработанный кермет (P = 300–900 МПа). Для сравнения: № 2 — материал из ПАП-2 без микросфер (P = 700 МПа); № 3 — спеченная алюмооксидная керамика α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (размеры кристаллов 20–100 мкм).

ной керамики (№ 3), поскольку лимитируются свойствами корундовых микросфер, содержание которых в кермете значительно (90 об. %). Следует отметить, что введение в состав алюминиевой связки (ПАП-2) корундовых микросфер приводит к значительному снижению пластичности кермета по сравнению с материалом из ПАП-2 без микросфер. Это подтверждается особенностью кривых деформирования образцов при осевом сжатии (рис. 5).

Анализ этих кривых показывает (см. рис. 5), что при нагружении кермета реализуется квазихрупкое разрушение: на участке  $0a$  наблюдается линейно-упругая деформация, далее — на участке  $ab$  имеет место нелинейное деформи-

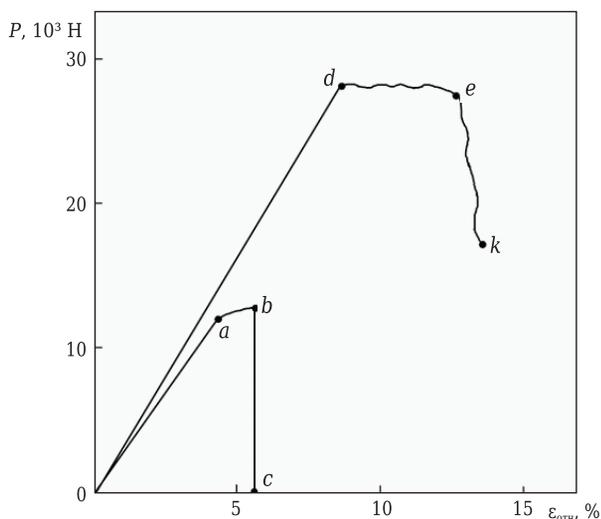


Рис. 5. Диаграммы деформирования образцов.  $P$ – $\varepsilon$  — нагрузка–деформация при осевом сжатии:  $0abc$  — для разработанного кермета;  $0dek$  — для материала из ПАП-2 без микросфер

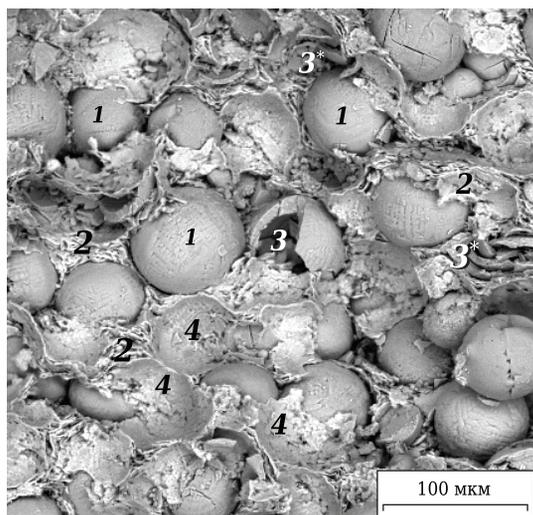


Рис. 6. РЭМ-фрактограмма поверхности разрушения кермета  $Al-\alpha-Al_2O_3$  (90 об. %): 1 — целые микросферы; 2 — разрушенная связка из ПАП-2; 3 — вскрытая оболочка микросферы; 3\* — осколки микросферы, разрушенной вследствие раздавливания; 4 — отпечатки микросфер в связке из ПАП-2

рование вследствие проявления некоторой пластичности, в точке  $b$  происходит скачок трещины (участок  $bc$ ). Тогда как для материала из ПАП-2 после участка линейно-упругой деформации  $0d$  наблюдается протяженная площадка  $de$ , обусловленная проявлением значительной пластической деформации, в точке  $e$  происходит медленное падение нагрузки (участок  $ek$ ), сопровождающееся образованием в образце продольных трещин.

Очевидно, что снижение пластичности кермета закономерно в результате введения в его состав значительного количества высокотвердой хрупкой дисперсии в виде микросфер, которая определяет доминирующие свойства материала. Вследствие этого полученный кермет характеризуется сочетанием малой плотности (высокой пористости) со значительной твердостью при достаточно высоких показателях прочностных характеристик для пористого материала (см. таблицу).

Изучение РЭМ-фрактограмм поверхностей разрушения образцов кермета при сжатии (рис. 6) показало, что большая часть микросфер 1 не разрушается при прохождении фронта трещины через живое сечение материала. То есть разрушение кермета лимитируется в основном разрушением алюминиевой связки 2 из ПАП-2, на которую передаются повышенные напряжения от микросфер — концентраторов напряжений. При этом наблюдается незначительное количество разрушенных микросфер 3 за счет вскрытия оболочек с образованием внутренних полостей и острых кромок, а также вследствие раздавливания оболочек с образованием осколков 3\*. Фиксируются также отпечатки (углубления) 4 в алюминиевой связке от микросфер, оставшихся в контрповерхности за счет их отрыва от связки при прохождении фронта трещины.

Можно полагать, что разрушение оболочек наблюдается в микросферах, у которых соотношение  $t/D$  (см. рис. 7) составляет некоторую

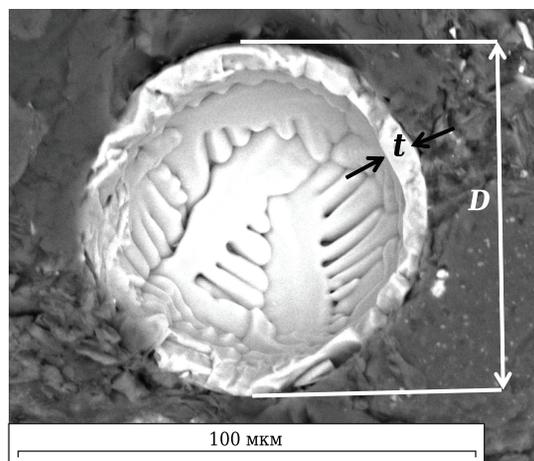
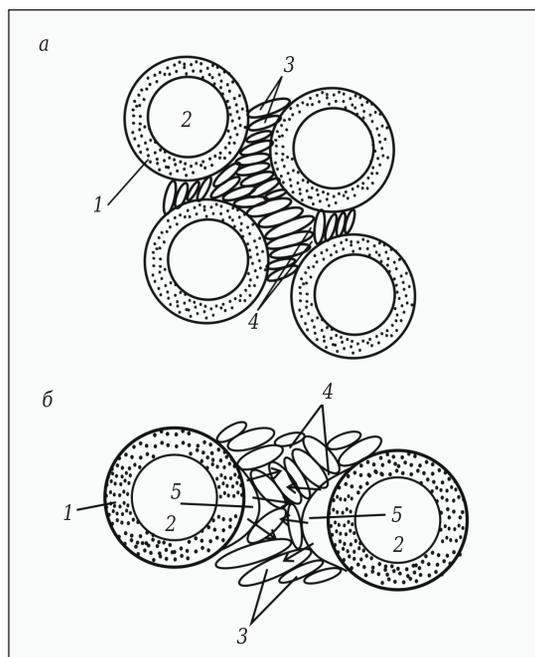


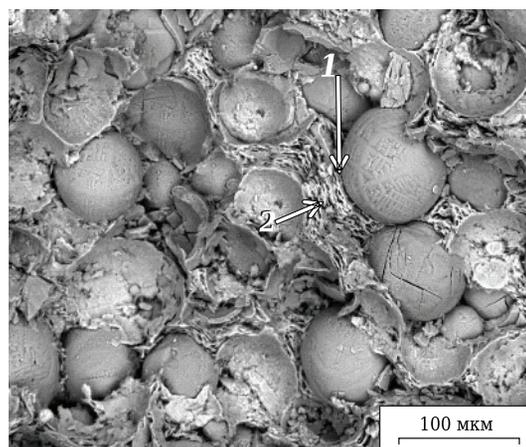
Рис. 7. Микросфера в сечении с поверхности шлифа:  $t$  — толщина оболочки (~5 мкм);  $D$  — диаметр (~70 мкм)



**Рис. 8.** Схематическое представление структуры материала на стадии прессования (а) и спекания (б): 1 — микрошеры (сечение); 2 — полость в объеме микрошеры; 3 — чешуйчатые частицы ПАП-2 в составе алюминиевой связки; 4 — щелевидные поры-микроазоры по границе частиц 3; 5 — микрополости, образующиеся в результате локального отрыва алюминиевой связки от микрошеры; стрелками показано направление перемещения алюминиевой связки вследствие усадки

критическую величину, при которой прочность микрошеры резко снижается и она теряет несущую способность. Авторами настоящей статьи установлено, что в используемой фракции корундовых микрошеры наиболее тонкостенными ( $t = 5\div 7$  мкм) являются самые крупные микрошеры ( $D = 70$  мкм), для которых параметр  $t/D$  варьируется от  $7,14 \cdot 10^{-2}$  до  $10^{-1}$  (см. рис. 7). Это значение можно считать критическим для микрошеры в составе данного кермета, поэтому наблюдалось их разрушение.

Механизм образования открытой пористости в структуре кермета (рис. 8) может быть представлен как локальный отрыв алюминиевой связки 3 (из чешуйчатых частиц ПАП-2) от каркаса из корундовых микрошеры 1 вследствие усадки в процессе жидкофазного спекания. В этом случае происходят формирование микрополостей 5 и образование щелевидных пор-микроазоров 4 по границе раздела чешуйчатых частиц ПАП-2. Предложенный механизм подтверждается результатами РЭМ (рис. 9). Следует отметить, что между микрошерами и алюминиевой связкой реализуется адгезионный тип связи [31] в результате кристаллизации эвтектического расплава  $Al-Al_4C_3$  при охлаждении от температуры спекания.



**Рис. 9.** Иллюстрация к механизму формирования открытой пористости в структуре кермета  $Al-\alpha-Al_2O_3$ : 1 — микрошера между микрошерами и связкой из ПАП-2; 2 — щелевидные поры-микроазоры между чешуйчатыми частицами ПАП-2

Таким образом, разработанный кермет можно рекомендовать для использования в качестве абразивного инструмента (так называемого «мягкого абразива») для выглаживания поверхности деталей из металлов и сплавов на стадии финишной механической обработки. При этом открытое поровое пространство позволит хорошо впитывать и удерживать алмазную пасту и смазочно-охлаждающую жидкость. В данном случае мягкая абразивная обработка будет достигаться за счет истирающего воздействия корундовых микрошеры совместно с выглаживающим воздействием алмазной пасты на поверхность обрабатываемой детали.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Кермет состава  $Al-\alpha-Al_2O_3$ , изготовленный с использованием полых корундовых микрошеры узкой фракции 40–70 мкм, полученных методом плазменной сфероидизации, отличается сочетанием малой плотности (высокой пористости) со значительной твердостью при достаточно высоких показателях прочностных характеристик для пористого материала.

- Зафиксировано снижение пластичности кермета по сравнению с материалом из ПАП-2, что закономерно при содержании в кермете значительного количества высокотвердой хрупкой дисперсии в виде микрошеры.

- Изучение фрактограмм поверхностей износа образцов кермета показало, что преобладающая часть микрошеры не разрушается при прохождении фронта трещины через живое сечение материала, однако наблюдается разрушение незначительной части микрошеры, для которых соотношение толщины оболочки и диаметра составляет некоторую критическую величину, из-

меняющуюся в пределах от  $7,14 \cdot 10^{-2}$  до  $10^{-1}$ . Эта критическая величина относится к наиболее тонкостенным (5–7 мкм) и самым крупным ( $D = 70$  мкм) микросферам в структуре кермета, которые разрушались путем вскрытия оболочек с образованием внутренних полостей и раздавливанием с образованием осколков. В основном разрушение кермета лимитируется распространением фронта трещины по алюминиевой связке (ПАП-2) и отрывом из нее микросфер.

Методом РЭМ установлено, что открытое поровое пространство в структуре кермета образуется путем локального отрыва алюминиевой связки (из чешуйчатых частиц ПАП-2) от каркаса из корундовых микросфер вследствие усадки в процессе жидкофазного спекания. При этом формируются микрополости, а также ми-

кросазоры по границе раздела чешуйчатых частиц ПАП-2. Можно полагать, что между микросферами и алюминиевой связкой формируется адгезионный тип связи при кристаллизации эвтектического расплава  $Al-Al_4C_3$ .

Разработанный кермет можно использовать в качестве «мягкого» абразивного инструмента для выглаживания поверхности деталей из металлов и сплавов на стадии финишной механической обработки.

\*\*\*

*Исследования выполнены в рамках базовой части государственного задания вузам №11.7568.2017/Б4 с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.*

### Библиографический список

- Zhu, W.** Effects of alumina hollow microspheres on the properties of water-borne polyurethane films / *W. Zhu, Y. Cui, C. Li* // *J. Mater. Res.* — 2018. — № 33. — P. 2486–2493.
- Павлычева, Е. А.** Разработка термостойкого полимерного композиционного материала для технической теплоизоляции / *Е. А. Павлычева* // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* — 2021. — № 7. — С. 51–55.
- Пат. 2690807 Российская Федерация, С 08 L 9/00.** Композиционная резиновая смесь для акустических покрытий / Михайлов Ю. М., Резников М. С., Мингазов А. Ш., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И.; заявл. 19.06.18; опубл. 05.06.19, Бюл. № 16.
- Пат. 2482146 Российская Федерация.** Высокотемпературное теплозащитное покрытие / Григорьев Ю. А. — № 2011136161; заявл. 31.08.11; опубл. 20.05.13, Бюл. № 14.
- Солоненко, О. П.** Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер / *О. П. Солоненко, И. П. Гуляев, А. В. Смирнов* // *Письма в ЖТФ.* — 2008. — Т. 34, вып. 24. — С. 22–27.
- Pedraza, F.** Rheological behavior, synthesis and performance of smart thermal barrier coating systems based on hollow alumina / *F. Pedraza, B. Rannou, G. Boissonnet* [et al.] // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering.* — 2015. — Vol. 3, № 12. — P. 17–22.
- Zhenguei, Niec.** Fabrication of porous alumina ceramics using hollow microspheres as the pore-forming agent / *Niec Zhenguei, Yuyi Lin* // *Journal of the KSMTE.* — 2015. — Vol. 24, № 4. — P. 368–373.
- Красный, Б. Л.** Теплоизоляционный огнеупорный материал на основе полых корундовых микросфер / *Б. Л. Красный, В. П. Тарасовский, А. Б. Красный* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 12. — С. 29–31.
- Stonys, R.** Effects of hollow corundum microspheres additive on physical and mechanical properties and thermal shock resistance behavior of bauxite based refractory castable / *R. Stonys, J. Malaiškieņė, J. Škamat, V. Antonovič* // *Materials.* — 2021. — № 14. — P. 4736–4746.
- Chatterjee, M.** Hollow alumina microspheres from boehmite sols / *M. Chatterjee, D. Enkhtuvshin, B. Siladitya* // *J. Mater. Sci.* — 1998. — Vol. 33. — P. 4937–4942.
- Wei-Wei, Cai.** A facile one-step route to synthesize titania hollow microspheres with incontinuous multicavities / *Cai Wei-Wei, Yang Hui, Guo Xing-Zhong* // *Chin. Chem. Lett.* — 2014. — Vol. 25, № 03. — P. 441–446.
- Ai-Juan, Wang.** Recent progress on the fabrication of hollow microspheres / *Wang Ai-Juan, Lu Yu-Peng, Sun Rui-Xue* // *Mater. Sci. Eng., A.* — 2007. — Vol. 460/461 (8). — P. 1–6.
- Jiabin, Zhou.** Facile synthesis of alumina hollow microspheres via trisodium citrate-mediated hydrothermal process and their adsorption performances for *p*-nitrophenol from aqueous solution / *Zhou Jiabin, Wang Lei, Zhang, Yu Jianguo* // *J. Colloid Interface Sci.* — 2013. — (394). — P. 509–514.
- Yu-Xin, Miao.** Alumina hollow microspheres supported gold catalysts for low-temperature CO oxidation: effect of the pretreatment atmospheres on catalytic activity and stability / *Miao Yu-Xin* // *Gold Bull.* — 2014. — № 47. — P. 275–282.
- Kato, T.** Preparation of hollow alumina microspheres by ultrasonic spray pyrolysis / *T. Kato, T. Masamutsu, S. Keigo* [et al.] // *J. Ceram. Soc. Jpn.* — 2002. — Vol. 110, № 3. — P. 146–148.
- Kato, T.** Fabrication of hollow alumina microspheres via core/shell structure of polymethylmethacrylate / alumina prepared by mechanofusion / *T. Kato, H. Ushijima, M. Katsumata*. // *J. Mater. Sci.* — 2002. — № 37. — P. 2317–2321.
- Васин, А. А.** Структура и свойства керамик из порошков, полученных химическим диспергированием алюминий-магниевого сплава с повышенным содержанием магния: дис. ... канд. техн. наук / *Васин А. А.* — М., 2015. — 165 с.
- Пат. 2663886 Российская Федерация, С 03 В 19/1075, С 03 В 19/109.** Способ получения полых микросфер оксидов металлов / Тарасов А. А., Кудряш М. Н., Тарасов Д. А.; заявл. 24.01.17; опубл. 13.08.18, Бюл. № 23.
- Цветков, Ю. Н.** Получение порошков в плазменных реакторах на базе электродугового плазматрона / *Ю. Н. Цветков, А. В. Самохин, Н. В. Алексеев, Ю. В. Астахов, М. А. Синайский, Д. Е. Курпичев, А. А. Фадеев* (сб. науч. трудов Ин-та металлургии и материаловедения).

- дения им. А. А. Байкова). — М. : Интерконтакт Наука, 2018. — 644 с.
20. **Туманов, Ю. Н.** Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю. Н. Туманов. — М. : Физматлит, 2010. — 968 с.
21. **Kraxner, J.** Hollow polycrystalline YAG microspheres by flame synthesis / J. Kraxner, J. Chovanec, K. Haladejová [et al.] // Mater. Lett. — 2017. — Vol. 204. — P. 181–183.
22. **He, M. Y.** On the mechanics of microballoon — reinforced metal matrix composites / M. Y. He, B. Wu, F. W. Zok // Mech. Mater. — 1995. — Vol. 20, № 4. — P. 315–328.
23. **He, M. Y.** Influence of thermal expansion mismatch on residual stresses and flow response of microballoon composites / M. Y. He, M. Kiser, B. Wu, F. W. Zok // Mech. Mater. — 1996. — Vol. 23, № 2. — P. 133–146.
24. **Tao, X. F.** Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres / X. F. Tao, L. P. Zhang, Y. Y. Zhoe // Materials and Desing. — 2009. — Vol. 30, № 7. — P. 2732–2736.
25. **Balch, Dorian K.** Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static condition / Dorian K. Balch, John G. O Dwyer, George T. Gray, David C. Dunand // Mater. Sci. Eng., A. — 2005. — A391. — P. 408–417.
26. **Santa Maria, J. A.** Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams. Part I: Effect of matrix strength and hollow sphere size on the quasi-static properties of Al–A206/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / J. A. Santa Maria, B. F. Schultz, J. B. Ferguson, P. K. Rohatgi // Mater. Sci. Eng., A. — 2013. — A582. — P. 415–422.
27. **Ferguson, J. B.** Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams. Part II: Predicting mechanical properties of metal matrix syntactic foams reinforced with ceramic spheres / J. B. Ferguson, J. A. Santa Maria, B. F. Schultz, P. K. Rohatgi // Mater. Sci. Eng., A. — 2013. — A582. — P. 423–432.
28. **Orbulov, Imre Norbert.** Microstructure of metal-matrix composites reinforced by ceramic microballoons / Imre Norbert Orbulov, Kornél Májliger // Mater. Technol. — 2012. — Vol. 46, № 4. — P. 375–382.
29. **Ivanov, D. A.** Investigation of physical-mechanical properties and structure of layered cermet Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> / D. A. Ivanov // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 393–398.
- Иванов, Д. А.** Изучение физико-механических свойств и структуры слоистого кермета Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> / Д. А. Иванов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 7. — С. 45–50.
30. **Ivanov, D. A.** The structure and phase composition of the cermet charge in the Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system obtained using mechanical processing of aluminum powder in a planetary ball mill / D. A. Ivanov, G. E. Val'vano, T. I. Borodina // Refract. Ind. Ceram. — 2021. — Vol. 62, № 3. — P. 324–331.
- Иванов, Д. А.** Структура и фазовый состав керметной шихты в системе Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученной механической обработкой алюминиевого порошка в планетарной мельнице / Д. А. Иванов, Г. Е. Вальвано, Т. И. Бородина // Новые огнеупоры. — 2021. — № 6. — С. 31–38.
31. **Иванов, Д. А.** Композиционные материалы : уч. пособ. для вузов / Д. А. Иванов, А. И. Ситников. — М. : Юрайт, 2019. — 253 с. ■

Получено 21.02.21

© Д. А. Иванов, Д. А. Тарасов,  
М. Н. Кудряш, Л. В. Федорова, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



УГЛЕРОДНОЕ  
ОБЩЕСТВО

ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# УГЛЕРОД:

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ,  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ

---

**Тематика:**

- ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ СИНТЕЗА АЛМАЗОВ;
- МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛМАЗОВ И НОВЫХ ФОРМ УГЛЕРОДА;
- УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИЕ КОМПОЗИТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ;
- НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ СОЗДАНИИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ, ПРИМЕНЕНИЕ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ;
- СОРБЦИОННЫЕ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ, В ТОМ ЧИСЛЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ, МАТЕРИАЛОВ;
- МЕТОДЫ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

**7–9 июня 2022 г.**

**Москва, г. Троицк**

[www.ruscarbon.org/](http://www.ruscarbon.org/)